

УДК 628.93.729.391.1

М.Г. БУРМА, В.М. ПОЛІЩУК, В.Ф. РОЙ

**РЕГУЛЮВАННЯ РЕЖИМАМИ РОБОТИ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ
ОСВІТЛЮВАЛЬНИХ УСТАНОВОК**

Аналізується можливість використання методу імпульсно-фазового та широтно-імпульсного регулювання режимами роботи освітлювальних установок з метою оптимізації їх світлотехнічних та електротехнічних параметрів та підвищення надійності та енергоекономічності. Розглянуті в роботі тиристорні регулюючі пристрої з природною комутацією змінного струму в режимах ІФР та ШІР дають змогу на основі знайдених залежностей для термінів та струмів перемикачів визначити необхідні параметри систем регулювання на основі обмежувачів та вимикачів струму освітлювальних установок в режимі регулювання потужності та в залежності від типу і характеру їх навантаження.

Ключові слова: джерело світла, енергоефективність, освітлювальна установка, електричні кола, регулюючий пристрій, тиристорний ключ, режим роботи лампи, активне та реактивне навантаження.

Анализируется возможность использования методов импульсно-фазового и широтно-импульсного регулирования режимами работы осветительных установок с целью оптимизации их светотехнических и электротехнических параметров и повышения надёжности и энергоэкономичности. Рассмотренные в работе тиристорные регулирующие устройства с естественной коммутацией переменного тока в режимах ИФР та ШИР дают возможность на основе полученных зависимостей для времён переключения и рабочих токов определить необходимые параметры элементов систем регулирования на основе ограничителей и выключателей тока осветительных установок в режимах регулирования мощности в зависимости от типа и характера их нагрузки.

Ключевые слова: источник света, энергоэффективность, осветительная установка, электрические цепи, регулирующее устройство, тиристорный ключ, режим работы лампы, активная и реактивная нагрузка.

It was analysing the possibility of pulse-phase and operating regime of lighting options to optimize lighting and electrotechnical parameters and to increase the reliable and power efficiency. The thyristor options, what was considered in article, are options with natural commutation of feeding current in pulse-phase and width-pulse regimes. The analysis of commutation processes for switching times and working currents allow to determine the required parameters of the systems elements on the base of restraints and current switching on the dependence of type and load character.

Keywords: light sources, energy effective, light options electric circles, operating options, thyristor switch, lamp working regime, active and reactive load.

1. Аналіз літературних джерел. Розробка сучасних енергоекономічних систем освітлення неможлива без використання в освітлювальних установках (ОУ) сучасних систем регулювання інтенсивності світлового потоку в залежності від нормативних вимог освітлення для конкретного виду робочих приміщень. Загальноєвропейські стандарти якості освітлення DALI та DMX регламентують норми освітлення для різних умов праці, що створює можливість програмувати роботу систем освітлення в автоматичному режимі з врахуванням рівня зовнішнього освітлення. Останніми дослідженнями доведено, що найбільш ефективними методами керування режимами роботи ОУ, є системи повільного регулювання освітлення по заданій програмі, яке забезпечує рівномірний розподіл освітленості робочих поверхонь у всьому діапазоні регулювання [1]. Дослід експлуатації таких установок за кордоном свідчить, що економія електроенергії на освітлення досягає при цьому більш як 50% , що дає змогу відшкодувати витрати на впровадження таких керованих ОУ на протязі 1,5 – 2 років [2]. Зокрема, в ФРН до 80% всіх ОУ впроваджені в комплекс інженерного обладнання приміщень цифровими інтелектуальними системами світлорегулювання, які дають змогу здійснювати на протязі доби динамічну зміну світлового середовища в залежності від інтенсивності природного освітлення [3]. В нерегульованих ОУ для компенсації зменшення світлового потоку ламп в процесі горіння, який досягає 0,6-0,8 від початкового рівня, на початку експлуатації встановлюють напругу живлення на 30% вищу, за номінальну, що призводить до збільшення втрат електроенергії і зменшення строку служби розрядних ламп.

Системи автоматичного регулювання освітлення дають змогу крім економії електроенергії, одночасно суттєво (майже удвічі) збільшити строк служби розрядних ламп [4, 5].

2. Мета дослідження. Керування роботою освітлювальних установок може здійснюватися дискретним або повільним регулюванням електричного режиму її джерел світла (ДС). Це висуває відповідні умови до схемотехніки побудови самого регулюючого пристрою, тому виникає необхідність провести аналіз роботи таких системи з метою визначення оптимальних параметрів їх елементів і режимів роботи в залежності від типу і характеру їх навантаження. Як відомо, сучасні джерела світла ОУ поділяються на дві принципово різні групи: це теплові ДС, які являють собою активне навантаження на ланцюги ОУ і розрядні ДС, які містять в електричному ланцюгу реактивний елемент (дросьель або конденсатор) що потребує окремого підходу до вибору систем керування ОУ та їх параметрів в залежності від типу навантаження освітлювальної установки.

Найбільш ефективною є система регулювання шляхом зміни форми напруги живлення (рис. 1). Потужність ДС може регулюватись, якщо вони живляться через баластні індуктивного типу і не мають в колах живлення баластних конденсаторів. При цьому компенсація коефіцієнта потужності може здійснюватись на стороні живлячої мережі, де розташований регулятор потужності. Важливим є те, що на відміну від інших типів регуляторів, де в процесі регулювання суттєво змінюється кольорова температура і індекс кольоропередачі випромінювання, – в даному випадку

така зміна практично не відбувається. Позитивним результатом роботи регуляторів з електромагнітними елементами і нестандартною формою струму є підвищення світлова віддача в режимі повільного світло-регулювання [6].

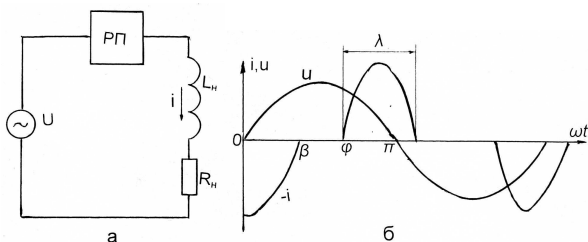


Рис. 1 – Схема контуру комутації з активно-індуктивному навантаженні і регулюючим пристроєм (а), діаграма його роботи (б).

При виборі найбільш ефективного способу регулювання світлового потоку ДС важливим фактором є також ступень лінійності його робочої характеристики, тому вибір оптимальної схеми керування ОУ повинен здійснюватись на базі комплексного врахування усіх перелічених факторів.

3. Основна частина. Розглянемо один з ефективних методів регулювання струму в навантаженні, який може бути застосований не тільки в регуляторах потужності ДС, але також в ключових стабілізаторах напруги та інших споживачах стабілізованого струму, а саме – регулювання в навантаженні з протито-ерс. Відмінністю таких схем є наявність в ланцюгу навантаження індуктивного, ємнісного або резистивного баласту, який обмежує величину струму навантаження (рис. 2, а, б). Перша схема може використовуватися в якості стабілізаторів струму і напруги, друга – в якості регулятора режиму роботи ДС [7].

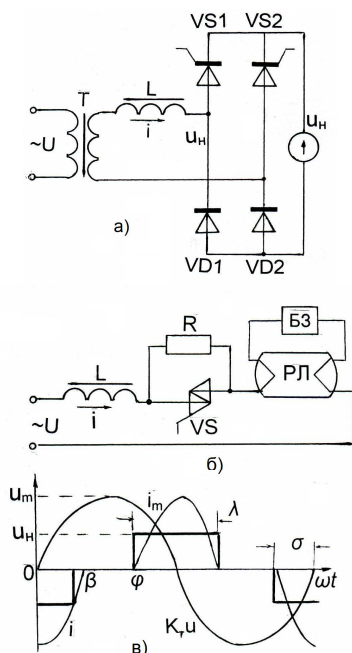


Рис. 2 – Регулюючі тиристорні пристрої з індуктивним баластом (а) та діаграма їх роботи (б).

Регулювання величини струму навантаження здійснюється або методом імпульсно-фазового (ІМФ), або широтно-імпульсного регулювання (ШІР), які відрізняються лише тривалістю часу t_b імпульсного ввімкнення силового тиристора VS (при ІФР $t_b < T/2$, а при ШІР $t_b > T/2$) [8]. В інтервалі ввімкненого стану VS ($\frac{\varphi}{\omega} \leq t \leq \frac{\varphi + \lambda}{\omega}$), де λ, φ – кути ввімкнення і провідності VS (рис. 2, в). Здійснюючи апроксимацію напруги живлення ДС u_n еквівалентним генератором прямокутної напруги U_n , для схеми рис. 2, б отримаємо рівняння, яке справедливе без урахування струму резистора R та не ідеальності дроселя L і трансформатора T [9]

$$\kappa_m u = \kappa_m U_m \sin(\omega t + \varphi) = L \frac{di}{dt} + U_n, \quad (1)$$

де $\kappa_m = W_1/W_2$, (W_1, W_2 – первинні і вторинні витки трансформатора T); $\kappa_m = 1$ для обох схем рис. 1, а, б.

Рішення рівняння (1) з початковою умовою $i(0) = 0$ має вигляд

$$i = \frac{\kappa_m \cdot U_m}{\omega L} [\cos \varphi - \cos(\omega t + \varphi) - v \omega t], \quad (2)$$

де $v = \frac{U_n}{\kappa_m U_m}$. При цьому напруга на дроселі L

$$u_{dp} = L \frac{di}{dt} = \kappa_m U_m [\sin(\omega t + \varphi) - v]. \quad (3)$$

Кут провідності λ тиристора визначаємо з рівняння (2) при умові $i = 0$

$$\lambda = \pi - \varphi + \beta, \quad (4)$$

де $\beta = v + \sqrt{v^2 + 2[1 + \cos \varphi - v(\pi - \varphi)]}$.

Граничне значення кута $\beta = \beta_{\max}$, яке відповідає режиму без пауз струму в навантаженні ($\varphi = \beta_{\max}$, $\lambda = \pi$), $\beta_{\max} = \arccos(\pi v / 2)$, звідки $v < 2 / \pi$.

Діапазон зміни кута ввімкнення φ регулятора при роботі з паузами струму в навантаженні (режим ІФР)

$$\beta_{\max} \leq \varphi \leq \pi - \sigma,$$

де $\sigma = \arcsin v$ – кут, при якому виконується умова $u = U_n$.

Значення кута $\varphi_0 = \pi - \varphi - \sigma$, при якому амплітуда струму i досягає максимальної величини, знаходимо досліджуючи залежність (2) на екстремум

$$I_m = \frac{\kappa_m U_m}{\omega L} [\cos \varphi + \cos \sigma - v(\pi - \varphi - \sigma)]. \quad (5)$$

Без врахування струму резистора, величини середніх значень струму I_{cp} , потужності P та діючої величини струму навантаження I_d визначаємо з наступних рівнянь:

$$I_{cp} = \frac{1}{\pi} \int_0^\lambda i d\varphi = \quad ; \quad (6)$$

$$= \frac{\kappa_m \cdot U_m}{\pi \omega \cdot L} [\lambda \cos \varphi - \sin(\lambda + \varphi) + \sin \varphi - \lambda^2 v / 2]$$

$$I_d = \frac{\kappa_m \cdot U_m}{\sqrt{\pi \omega L}} \left[\lambda / 2 - 2\lambda v^2 + \lambda^3 v^2 / 3 + \right. \\ \left. + (\lambda \cos \varphi + 2 \sin \varphi)(\cos \varphi - \lambda v) + (\sin 2\beta + 3 \sin 2\varphi) / 4 \right]^{1/2} \\ P = I_{cp} U_n; \quad \varphi = \omega t.$$

Значення граничних величин параметрів $I_m = I_{mmax}$, $I_{cp} = I_{cpmax}$, $I_0 = I_{0max}$, які виникають при роботі регулятора в режимі без пауз струму в навантаженні ($\lambda = \pi$, $\beta = \beta_{max} = \varphi$) наведені в табл. 1, а на рис. 3, а, б розрахунків залежності для $I_m = f(\varphi)$ та $P = f(\varphi)$.

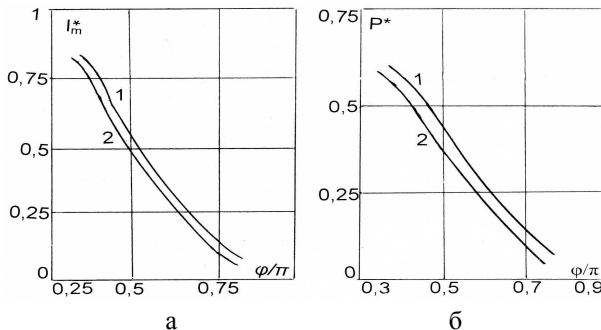


Рис. 3, а – Залежність амплітуди струму навантаження $I^* = I_m / (k_T U_m / \omega L)$ (відн. один.) від кута комутації φ тиристора при значеннях параметра $v = 0,3$ (1) і $v = 0,35$ (2); б – залежність потужності навантаження $P^* = P / (v k_T^2 U_m^2 / \omega L)$ (відн. один.) від кута комутації φ тиристора при значеннях параметра $v = 0,3$ (1) і $v = 0,35$ (2).

Форма струму в навантаженні наближена до синусоїдальної і при апроксимації її еквівалентною синусоїдою з кутовою частотою $\omega = \pi \omega / \lambda$ і амплітудою I_m з виразу (5) отримаємо спрощені вирази, які зручні для розрахунків:

$$I_{cp} = \frac{2\lambda}{\pi^2} I_m; \quad I_0 = \sqrt{\frac{\lambda}{2\pi}} I_m; \quad P = \frac{2\lambda I_m U_H}{\pi^2}. \quad (7)$$

Коефіцієнти амплітуди струму $\kappa_a = I_m / I_{cp}$ і форми $\kappa_\phi = I_0 / I_{cp}$ дорівнюють:

$$\kappa_a = \sqrt{\frac{2\pi}{\lambda}}, \quad \kappa_\phi = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{\pi}{2\lambda}}. \quad (8)$$

З врахуванням апроксимації граничні величини параметрів при $\lambda = \pi$ мають вигляд:

$$I_{cpmax} = \frac{2}{\pi} I_m; \quad I_{0max} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}; \quad P_{max} = \frac{2 I_m U_m}{\pi} \quad (9)$$

Напруга на виході регулюючого пристрою в режимі ІФР у випадку навантаження з противо-ерс U_H

$$U_{лин} = U_m \sin(\omega t + \varphi) - U_H \quad (10)$$

При цьому середнє $U_{лин ср}$ і діюче значення $U_{лин \delta}$ величини вихідної напруги:

$$U_{лин ср} = \frac{1}{\pi} \int_{\varphi}^{\varphi+\lambda} (U_m \sin \varphi - U_H) d\varphi = \frac{1}{\pi} \{ U_m [\cos \varphi - \cos(\varphi + \lambda)] - U_H \lambda \}, \quad (11)$$

$$U_{лин \delta} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\varphi}^{\varphi+\lambda} (U_m \sin \varphi - U_H)^2 d\varphi} = (1/\sqrt{\pi}) \{ (U_m^2/2 + U_H^2) \lambda + U_m^2/4 [\sin 2\varphi - \sin 2(\varphi + \lambda)] + 2 U_m U_H [\cos(\varphi + \lambda) - \cos \varphi] \}^{1/2},$$

$$\varphi = \omega t.$$

Таблиця 1 – Екстремальні параметри регулятора струму

Параметр	Математичний вираз параметру
I_{mmax}	$\frac{\kappa_m U_m}{\omega L} \left[\sqrt{1-v^2} - \frac{\pi v}{2} + v \left(\arccos \frac{\pi v}{2} + \arcsin v \right) \right]$
I_{cpmax}	$\frac{2 \kappa_m U_m}{\pi \omega L} \sqrt{1 - \left(\frac{\pi v}{2} \right)^2}$
I_{0max}	$\frac{\kappa_m U_m}{\omega L} \sqrt{\frac{1}{2} + v^2 \left(\frac{\pi^2}{12} - 2 \right)}$
$U_{лин ср}$	$\frac{1}{\pi} \int_{\varphi}^{\varphi+\lambda} (U_m \sin \varphi - U_H) d\varphi$
$U_{лин \delta}$	$\sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\varphi}^{\varphi+\lambda} (U_m \sin \varphi - U_H)^2 d\varphi}$

При відносно невеликих струмах навантаження в режимі ІФР замість індуктивного може використовуватись резистивний баласт [10] (рис. 4). При цьому, струм навантаження на протязі ввімкненого стану силового тиристора VS (рис. 3) $\varphi/\omega \leq t \leq \varphi_{max}$

$$i = \frac{\kappa_m U_m}{R} [\sin(\omega t + \varphi) - v]. \quad (13)$$

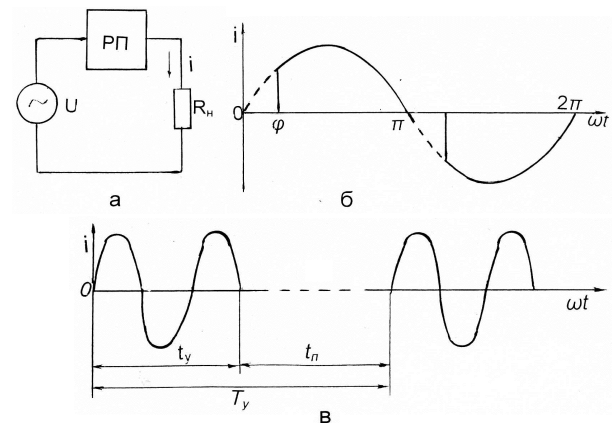


Рис. 4 – Схема контуру комутації з регулюючим пристроєм і активному навантаженні (а) та діаграми струму при ІФР (б) і ШІР (в).

Цей режим може бути реалізований при змінах кута ввімкнення пристрою в інтервалі кутів

$$\varphi_{min} \leq \varphi \leq \varphi_{max}$$

$$(\varphi_{min} = \arcsin v;$$

$$\varphi_{max} = \arccos 2 \cos v).$$

Кут провідності λ ІФР, визначений з умови $i = 0$, дорівнює $\lambda = \varphi_{max} - \varphi$

При цьому, величина середнього і діючого значення струму навантаження, відповідно дорівнюють:

$$I_{cp} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\lambda} i d\varphi = \frac{\kappa_m U_m}{\pi R} [-\lambda v + \cos \varphi - \cos(\lambda + \varphi)]; \quad (14)$$

$$I_{\partial} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\lambda} i^2 d\varphi} = \quad (15)$$

$$= \frac{\kappa_m U_m}{\sqrt{\pi R}} \left\{ \lambda v^2 - 2v [\cos \varphi - \cos(\lambda + \varphi)] + \lambda / 2 - \frac{1}{4} \sin 2\lambda \right\}^{\frac{1}{2}}$$

тут $\varphi = \omega t$.

Максимальних значень струми $I_{cp \max}$ та $I_{\partial \max}$ набувають при кутах $\varphi = \varphi_{\min}$.

Висновки. Розглянуті в статті режими роботи тиристорних регулюючих пристроїв для ОУ з природною комутацією змінного струму в режимах ІФР та ШПР дають змогу на основі знайдених залежностей для термінів та струмів перемикачів визначити необхідні параметри елементів обмежувачів та вимикачів струму в залежності від характеру навантаження. Аналіз отриманих залежностей дає змогу визначити оптимальні параметри електричних кіл розробляємих систем регулювання з реакторними або резисторними обмежувачами амплітуди струму в залежності від типу ДС ОУ. Дослідження комутаційних процесів при імпульсно-фазовому і широтно-імпульсному регулюванні струму при активних і активно-індукційних навантаженнях дають змогу визначити і розрахувати оптимальні параметри відповідних електричних схем таких систем, що забезпечують найбільшу ефективність їх використання.

Список література

1. Поскребко А.А. Бесконтактные коммутационные и регулирующие полупроводниковые устройства // М. – Энергия. – 1989. – 362 с.

2. Краснопольский А.Е., Соколов В.Б. Пускорегулирующие аппараты для разрядных ламп // М.: Энергоатомиздат. – 1999. – 207 с.
3. Бенцигер Т.Д. Светорегулирование в осветительных системах // Светотехника. – 2002. – № 1. – С. 27-30.
4. Соловьев А.К. Автоматическое регулирование искусственного освещения и его эффективность // Светотехника. – 1999. – № 5. – С. 2-5.
5. Marx P., Karstadt B., Albert D. A dimmable Electronic HF-Ballast for Fluorescent Lamps. Lux-europa. April/1999. p. 87-90.
6. Фомин Ф.Г. Системы автоматизированного управления освещением общественных зданий // Новости светотехники. Дом света. – М. – 1998. – 231 с.
7. INTELUX Manual Edition // 9906 D, Page 17.
8. Сосков А.Г. Колонтаевский Ю.П. Промислова електроніка: Підручник / за ред. Соскова А.Г. – К.: Каравелла, 2013. – 496 с.
9. Колонтаевский Ю.П., Сосков А.Г. Електроніка і мікросхемотехніка: Підручник / за ред. Соскова А.Г. – К.: Каравелла, 2007. – 384 с.
10. Флоренцев С.Н. Состояние и тенденции развития силовых IGBT-модулей. Электротехника. 2008, №4, С. 27-35.

References (transliterated)

1. Poskrebko A.A. Non-contact switching and regulating semiconductor devices. M. – Energia. – 1989. – 362 p.
2. Krasnopolsky AE, Sokolov V.B. Control gear for discharge lamps. M. : Energoatomizdat. – 1999. – 207 p.
3. Benzyeger TD Light regulation in lighting systems // Cvetotekhnika. – 2002. – No 1. – P.27-30.
4. Soloviev A.K. Automatic control of artificial lighting and its effectiveness. Light engineering. – 1999. – No 5. – p.2-5.
5. Marx P., Karstadt B., Albert D. A dimmable Electronic HF-Ballast for Fluorescent Lamps. Lux-europa. April/1999. p.87-90.
6. Fomin F.G. Systems of automated control of lighting of public buildings. News of lighting engineering. House of light. – M. – 1998. – 231 p.
7. INTELUX Manual Edition. 9906 D, Page 17.
8. Soskov A.G. Kolontaevsky Yu.P. Промислова електроніка: Підручник. for the red. Soskova A.G. – K.: Caravel, 2013. – 496 p.
9. Kolontaevsky Yu.P., Soskov A.G. Electronics and microcircuitry: A textbook. ed. Soskova A.G. – K.: Caravel, 2007. – 384 p.
10. Florentsev S.N. Status and development trends of power IGBT-modules. Electrical engineering. 2008, No. 4, pp. 27-35.

Поступила (received) 21.07.2017

Бібліографічні описи/Библиографические описания/Bibliographic descriptions

Регулювання режимами роботи електричних кіл освітлювальних установок / М.Г. Бурма, В.М. Поліщук, В.Ф.Рой // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ "ХПІ", 2017. – № 34 (1256). – С. 47–51. – Библиогр.: 10 назв. – ISSN 2079-3944.

Регулирование режимами работы электрических цепей осветительных установок / Н.Г. Бурма, В.Н. Поліщук, В.Ф. Рой // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ "ХПІ", 2017. – № 34 (1256). – С. 47–51. – Библиогр.: 10 назв. – ISSN 2079-3944.

Regulation regime functioning electric circuit illuminating plant (systems) / N. Burma, V. Polichuk, V. Roy // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No. 34 (1256). – P. 47–51. – Bibliography: 10. – ISSN 2079-3944.

Відомості про авторів / Сведения об авторах/ About the Authors

Бурма Микола Гаврилович - кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б. Е. Веркіна НАНУ: Харків: тел. (057) 707-33-16; e-mail: burma @ ilt kharkov. ua. ORCID ID 0000-0003-3925-0499

Бурма Николай Гаврилович - кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Физико-технический институт низких температур им. Б. Е. Веркина НАНУ: Харьков: тел. (057) 707-33-16; e-mail: burma @ ilt kharkov. ua. ORCID ID 0000-0003-3925-0499

Burma Nikolay Gavrilovich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences Sttnior Researcher. B.Verkin Institute for Low Temperature Physics and Engineering of the National Academy of Sciences of Ukraine; Kharkov, tel.:(057)707-33-16; e-mail : burma@kharcov.ua.

Полищук Валентина Миколайовна - кандидат технічних наук, доцент, декан факультету ЕОМ, Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова, e-mail- spets-sovet@gmail.ru ORCID ID 0000-0005-7056-1643

Полищук Валентина Николаевна - кандидат технических наук, доцент, декан факультета ЭОГ, Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А.Н.Бекетова, e-mail- spets-sovet@gmail.ru ORCID ID 0000-0002-7059-1454

Polichuk Valentyna Nikolaevna - Candidate of Technical Sciences, Dean of faculty EOG, O.V.Beketov National University of Urban Economy in Kharkov; Kharkov, e-mail: spets-sovet@gmail.ru. ORCID ID 0000-0002-7059-1454

Рой Віктор Федорович – доктор фізикоматематичних наук, професор кафедри СЕЕМ, Харківський національний університет міського господарства ім. О.М.Бекетова, тел. 7010232, e-mail-vicktor. Roj@gmail.com. ORCID ID 0000-0002-9001-9308

Рой Виктор Федорович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры СЭЭГ, Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А.Н.Бекетова, тел. 7010232, e-mail-vicktor. Roj@gmail.com. ORCID ID 0000-0002-9001-9308

Roy Victor Fedorovich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences Full Professor at the Department of Electricity cites, O.V.Beketov National University of Urban Economy in Kharkov; Kharkov, tel:7010232, e-mail:-vicktor. Roj@gmail.com. ORCID ID 0000-0002-9001-9308